



УДК 621.039

**РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАССИВНОГО
ОХЛАЖДЕНИЯ КОНТЕЙНЕРОВ С
РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ****CALCULATED RESEARCH OF PASSIVE COOLING
OF CONTAINERS WITH RADIOACTIVE WASTES**

Костарев Вячеслав Сергеевич, студент каф. «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: slavakostarev@yandex.ru, Тел.: +7(902)269-15-61

Климова Виктория Андреевна, ст. преподаватель каф. «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: v.a.klimova@mail.ru. Тел.: +7(953)000-84-00

Ташлыков Олег Леонидович, кан.-т. техн. наук, доцент каф. «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: otashlykov@list.ru. Тел.: +7(343)375-97-37

Kostarev S. Vyacheslav, Student, Department «Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: slavakostarev@yandex.ru. Ph.: +7(902)269-15-61

Viktoriya A. Klimova, senior lecturer, Department «Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: v.a.klimova@mail.ru, Ph.: +7(953)000-84-00

Tashlykov L. Oleg, Cand. Sci., Associate professor, Department «Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: otashlykov@list.ru. Ph.: +7(343)375-97-37

Аннотация: Приведено решение проблемы увеличения интенсивности охлаждения контейнеров с радиоактивными отходами с использованием компьютерного моделирования.

Abstract: The solution of the problem of increasing the cooling intensity of containers with radioactive wastes using computer simulation is given.

Ключевые слова: Компьютерное моделирование, радиоактивные отходы, остаточное тепловыделение, пассивный теплоотвод

Key words: Computer modeling, radioactive wastes, residual heat release, passive heat sink

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире проблема утилизации радиоактивных отходов (РАО) стоит на одном уровне с прочими экологическими проблемами. С ростом населения и развитием технологического прогресса количество радиоактивных отходов постоянно возрастает. Правильный сбор, хранение и утилизация таких отходов является довольно сложным и трудоемким процессом.

Конечной целью переработки РАО является их кондиционирование, т.е. перевод в стабильную физико-химическую форму, которая максимально ограничивает выход радионуклидов за пределы матрицы и инженерных барьеров в пунктах захоронения РАО.

Технические средства и меры по обеспечению радиационной безопасности при сборе, хранении и кондиционировании должны определяться из максимальной допустимой активности РАО и ограничивать воздействие на персонал, население и окружающую среду в соответствии с Нормами радиационной безопасности (НРБ-99/2009).

К контейнерам с РАО предъявляются требования: тепловыделение не должно превышать 5 кВт/м³, коэффициент теплопроводности должен быть в пределах 0,7-1,6 Вт/(м·К) в интервале температур 20-500 °С, температура доступных поверхностей упаковок не выше 50 °С при температуре окружающей среды 38 °С без учета инсоляции.

В данной работе исследованы температурные режимы, режимы пассивного охлаждения, способы повышения интенсивности пассивного теплоотвода (оребрение поверхности и др.) контейнеров с РАО. В качестве исходных данных принимаются объем контейнера, толщина и материал его стенок, а также радиоизотопный состав отходов.

В качестве отходов были приняты кубовые остатки АЭС с реактором БН-600 [1].

Таблица 1.
Состав кубовых остатков АЭС с БН-600

Состав	Концентрация, г/л
КОН	6
NaOH	60-100
Na ₂ CO ₃	23
NH ₄ HCO ₃	1-3
Al(NO ₃) ₃	120
CsCl	4-7
MnSO ₄	21

СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ И ПРОЕКТА

Перед началом моделирования были рассчитаны плотность, динамическая вязкость, теплоемкость и теплопроводность раствора с отходами при помощи методики, изложенной в справочнике «Физико-химические свойства бинарных и многокомпонентных растворов неорганических веществ», [2]. Плотность определялась по следующей формуле:

$$\lg \rho = \lg \rho_0 + \sum_{i=1}^k A_i c_i \quad (1),$$

где ρ — плотность многокомпонентного раствора, кг/м³; ρ_0 — плотность воды, кг/м³, рассчитываемая по формуле:

$$\rho_0 = 1000 - 0.062t - 0.00355t^2 \quad (2);$$

A_i — справочные коэффициенты; c_i — концентрация компонента, кг/кг

Динамическая вязкость рассчитывалась как:

$$\lg \eta = \lg \eta_0 + \sum_{i=1}^k D_i c_i \quad (3),$$

где η — вязкость многокомпонентного раствора, Па·с; η_0 — вязкость воды, Па·с, рассчитываемая по формуле:

$$\eta_0 = 0.59849(43.252 + t)^{-1.5423} \quad (4);$$

D_i — справочные коэффициенты; c_i — концентрация компонента, кг/кг

Теплоемкость определялась следующим образом:

$$c_p = c_{p0} + \sum_{i=1}^k (B_{1i} + B_{2i} \bar{c}_i + B_{3i} t + B_{4i} t^2) c_i \quad (5),$$

где c_p — теплоемкость многокомпонентного раствора, Дж/(кг·К); c_{p0} — теплоемкость воды, Дж/(кг·К), рассчитываемая по формуле:

$$c_{p0} = 4223.6 + 1.075t \ln |t / 100| \quad (6);$$

B_{ni} — справочные коэффициенты; c_i —

концентрация компонента, кг/кг; \bar{c}_i —

концентрация i -го компонента в бинарном изопиестическом растворе, кг/кг, определяемая по формуле:

$$\bar{c}_i = E_i^{-1} \sum_{i=1}^k E_i c_i \quad (7),$$

где E_i — справочный коэффициент.

Теплопроводность рассчитывалась как:

$$\lambda = \lambda_0 (1 - \sum_{i=1}^k \beta_i c_i) \quad (8),$$

где λ — теплопроводность раствора, Вт/(м·К); λ_0 — теплопроводность воды Вт/(м·К), рассчитываемая по формуле:

$$\lambda_0 = 0.5545 + 0.00246t - 0.00001184t^2 \quad (9);$$

β_i — справочные коэффициенты; c_i — концентрация компонента, кг/кг.

Расчеты проводились в диапазоне температур 0-100 °С с шагом 10 °С.

Таблица 2.
Результаты предварительных расчетов

Температура, °С	Плотность, кг/м ³	Динамическая вязкость, Па·с	Теплоемкость, Дж/(кг·К)	Теплопроводность, Вт/(м·К)
0	1199,15	0,0059	4024,76	0,53
10	1199,02	0,0042	4011,07	0,55
20	1197,78	0,0031	4006,06	0,57
30	1195,44	0,0023	4006,66	0,59
40	1191,99	0,0017	4010,89	0,61
50	1187,44	0,0013	4017,83	0,62
60	1181,78	0,0009	4026,92	0,63
70	1175,03	0,00075	4037,79	0,64
80	1167,18	0,00056	4050,19	0,65
90	1158,25	0,00042	4063,93	0,65
100	1148,23	0,00031	4078,84	0,65

Также были заданы объем отходов, толщина стенки контейнера (80 мм) и энерговыделение (1000 Вт/м³).

Была построена модель контейнера в программе Solidworks, расчет производился в приложении Solidworks Flow Simulation.

Были созданы модели контейнеров различной формы: цилиндрической, кубической и в прямоугольной, без ребер и с ребрами соответственно.

Результаты расчетов представлены в таблице:

Таблица 3.

Результаты расчетов

	Цилиндр		Куб		Параллелепипед	
	без ребер	с ребрами	без ребер	с ребрами	без ребер	с ребрами
$t_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	26,51	28,67	31,04	25,64	23,17	22,76
$t_{\text{бок. пов.}}, ^\circ\text{C}$	26,31	28,04	30,64	25,31	24,14	23,26
$t_{\text{верх. пов.}}, ^\circ\text{C}$	26,28	28,36	30,71	25,43	24,10	23,29
α Вт/(м ² ·К)	2,115	2,781	2,605	2,867	1,78	2,889

ВЫВОДЫ

Из анализа температурных режимов следует, что наименьшая температура наблюдается у контейнера в виде параллелепипеда с ребрами. При использовании данной геометрической формы обеспечивается наиболее эффективный отвод тепла от радиоактивных отходов за счет естественного (пассивного) охлаждения, что повышает безопасность при хранении РАО.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Скворцов А. И. Обращение с радиоактивными отходами при выводе из эксплуатации реактора на быстрых нейтронах: дис. кан. тех. наук: 05.14.03 / А. И. Скворцов; – М. РГБ, 2007. – 182 с.
2. Зайцев И. Д., Асеев Г. Г. Физико-химические свойства бинарных и многокомпонентных растворов неорганических веществ: –М.: Химия, 1988
3. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. «Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов» (НП-053-16)
4. Костарев В.С., Климова В.А., Ташлыков О.Л. Моделирование процесса охлаждения радиоизотопного термоэлектрического генератора // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых – Даниловских чтений. Екатеринбург: УрФУ, 2017. С. 814-818
5. Шумков Д.Е., Климова В.А., Ташлыков О.Л., Селезнев Е.Н. Повышение надежности охлаждения облученных топливных сборок ИЯР ИВВ-2М в шахте-хранилище // Физика. Технологии. Инновации ФТИ-2017 (15–19 мая 2017 г.) [Электронный ресурс] Тезисы докладов IV Международной молодежной научной конференции Екатеринбург: УрФУ, 2017. С.122-123